بررسی عملکرد استاتیکی و دینامیکی یاتاقان‌های گازی با استفاده از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی*

محمدرضا دهقانی زاده بغدادآبادی[1] اصغر دشتی رحمت آبادی[2] سید محمد تقی المدرسی[3]

چکیده از یاتاقان‌های گازی در صنایع مختلف، بویژه پزشکی و هوا فضا، به طور گسترده‌ای استفاده می‌شود. به علت تراکم پذیر بودن روان‌کار(گاز) تحلیل این نوع یاتاقان‌ها کار آسانی نمی‌باشد؛ از این رو در کار حاضر، از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی جهت بررسی عملکرد یاتاقان‌های گازی مدور و غیر مدور دو لب (Lobe)، سه لب و چهار لب استفاده شده است. به این منظور، میزان پایداری، اتلاف انرژی، ظرفیت تحمل بار و مقدار زاویه‌ی مشخصه‌ی یاتاقان‌های مذکور، تحت تاثیر پارامترهای ابعاد، نسبت خارج از مرکزی و عدد تراکم پذیری یاتاقان، مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج به دست آمده در این مطالعه، با نتایج گزارش شده‌ی قبلی که از روش اجزا محدود به دست آمده‌اند، مطابقت خوبی داشته و در عین حال، حجم محاسبات نیزکاهش یافته است. نتایج، حاکی از کارایی بالای شبکه‌های عصبی مصنوعی در طراحی و تحلیل مسائل مربوط به یاتاقان‌ها که روابط حاکم بر آن‌ها پیچیده و غیرخطی است، می‌باشد. ضمناً نتایج حاصل از بررسی عملکرد انواع یاتاقان‌های غیر مدور، می‌تواند راهنمای خوبی برای انتخاب یاتاقان بهینه برای کاربردهای خاص باشد.

واژه‌های کلیدی یاتاقان گازی مدور، یاتاقان گازی غیر مدور، شبکه‌ی عصبی مصنوعی

Investigation of Static and Dynamic Performance of Gas Lubricated Bearing Using Artificial Neural Networks

M. Dehghanizade Baghdadabadi A.D. Rahmatabadi S.M. Almodarresi

Abstract *Gas lubricated bearings are of tremendous use especially in the biomedical and aerospace industries. Analytical treatment of gas lubrication is tedious due to high nonlinearity of the pressure equation as the consequence of lubricant compressibility. Howevere, in this paper a feed-forward neural network approach is employed to investigate the performance of circular as well as two, three and four-lobe noncircular gas lubricated bearings. The performance parameters considered are stability margins, power loss, bearing load capacity and attitude angle for various values of bearing aspect ratio, eccentricity and compressibility numbers. The results of the neural network analyses are compared with those obtained from the finite element model. It is observed that results are in good agreement. It is believed that the neural network model can easily compete with the available theoretical model in predicting the solution of lubrication problems in respect to its simplicity, as well as its capability of producting accurate results with lesser computer time.*

Key Words Circular Gas Bearing, Noncircular Gas Bearing, Artificial Neural Network

*نسخه‌ی اول مقاله در تاریخ ۱۳۸۸/۳/۳۱ و نسخه‌ی نهایی آماده چاپ آن در تاریخ ۱۳۸۹/۲/۱۹ می‌باشد.

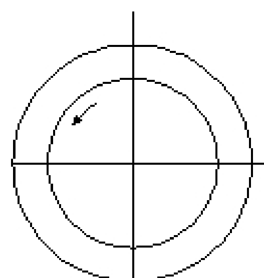
(۱) عهده‌دار مکاتبات: کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

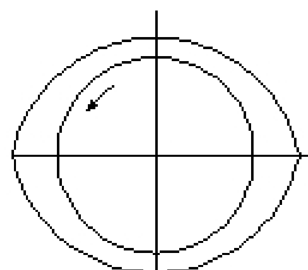
(۲) دانشیار، دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

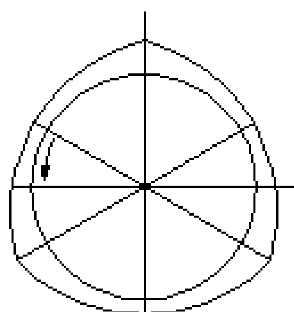
(۳) استادیار، دانشکده‌ی مهندسی برق، دانشگاه یزد، یزد

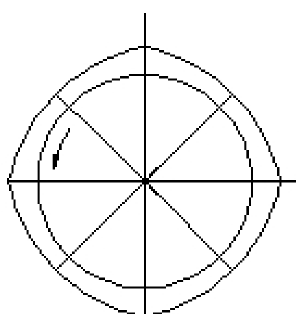
مقدمه

رشد تکنولوژی یاتاقان‌های گازی باعث توجه بسیاری از دانشمندان علم تریبولوژی (Tribology) و کاربرد زیاد آنها در صنایع گردیده است. یاتاقان‌های گازی، هم اکنون در صنایع هوایی، صنایع غذایی و دارویی، قطعات کامپیوترهای دیجیتال (Digital) و غیره به کار می‌روند و به دلیل فراوانی روانکار نظیر هوا، آلوده نکردن محیط، پایداری روانکار در بازهٔ وسیعی از تغییرات دما و کاهش اتلاف انرژی ناشی از نیروی اصطکاک، به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. از طرفی پایداری دینامیکی ضعیف و ظرفیت تحمل بار پایین، دو مشخصه‌ای است که کارآیی این نوع یاتاقان‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهند و بررسی عملکرد آنها به این لحاظ نسبت به یاتاقان‌های روغنی، اهمیت بیشتری می‌یابد؛ لذا بررسی عوامل تأثیر گذار بر عملکرد یاتاقان‌های گازی، برای استفاده بهینه از آنها و جلوگیری از هرگونه صدمه احتمالی، ضروری به نظر می‌رسد. شکل (۱) انواع متداول یاتاقان‌های گازی را نشان می‌دهد.


یاتاقان مدور


یاتاقان دو لب


یاتاقان سه لب


یاتاقان چهار لب

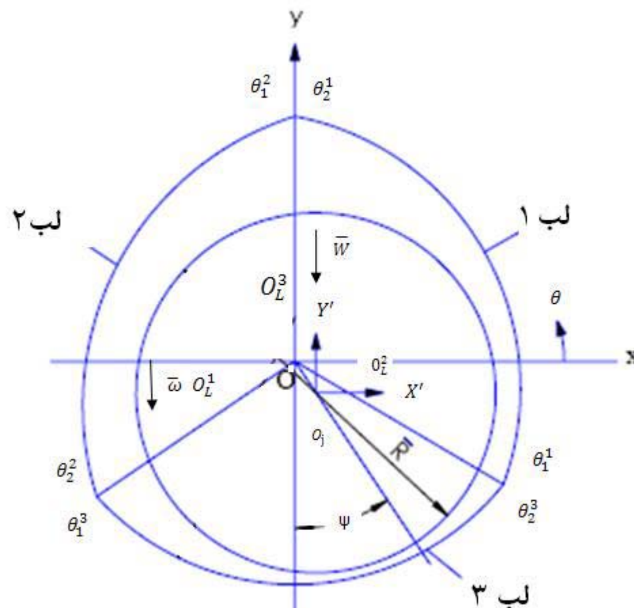
شکل ۱ انواع متداول یاتاقان‌های گازی

در طول چند دهه‌ی گذشته، تحقیقات نسبتاً زیادی بر روی یاتاقان‌های گازی انجام گرفته است. اولین بار در سال ۱۸۹۷ کینگس بری (Kingsbury) [2]، در مطالعات عملی خود از هوا به عنوان روانکار استفاده کرد و این نقطه شروعی برای استفاده از یاتاقان‌های گازی بود. سپس در سال ۱۹۱۹ هاریسون (Harrison) [3] یاتاقان‌های طویل گازی را مورد بررسی قرار داد. وی فرض کرد متوسط ضخامت فیلم در فضای لقی شعاعی محور یکسان باشد. تحقیقات اولیه بر روی یاتاقان‌های هیدرودینامیکی غیر مدور گازی توسط پینکوس (Pinkus) [4] انجام شد. چاندرا (Chandra) و همکارانش به محاسبه‌ی ضرایب دینامیکی یاتاقان‌های هیدرودینامیکی مدور با روش اجزاء محدود پرداخته و

پایداری یاتاقان‌های هیدرودینامیکی غیر مدور را نیز با تجزیه و تحلیل سیستم به روش خطی و حل معادلات به روش اجزا محدود، مورد مطالعه قرار دادند [5,6]. با آشکار شدن ویژگی‌های منحصر به فرد شبکه‌های عصبی درتحلیل مسائل پیچیده، کرکوب و الکامل (Karkoub and Elkamel) [7] درسال ۱۹۹۷، مدل توزیع فشار را روی یک یاتاقان چهارگوش گازی با دقت مطلوبی به دست آوردند. در سال ۲۰۰۵، یوان کنگ (Kang Yuan) [8]، با طراحی یک شبکه‌ی عصبی، سختی را در یک بلبرینگ محاسبه نمود. در کار حاضر نیز، با توجه به توانمندی‌های ویژه‌ی روش شبکه‌های عصبی مصنوعی، بررسی عملکرد یاتاقان‌های گازی، مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. بدین منظور، شبکه‌های عصبی مناسب طراحی شده و کد نویسی لازم انجام می‌پذیرد. در ادامه، چگونگی طراحی شبکه‌های عصبی مورد استفاده در این مقاله، به همراه نتایج حاصله آورده می‌شود.

معادلات حاکم

در یک سیستم یاتاقان و محور که محور، دارای سرعت یکنواخت می‌باشد و بار وارد بر سیستم نیز ثابت است، مرکز محور در یک موقعیت ثابت قرار می‌گیرد و هندسه‌ی فضای لقی بین محور و یاتاقان، همواره شکل ثابتی خواهد داشت. این وضعیت، حالت پایدار سیستم یاتاقان را تعریف می‌کند. هرگونه اغتشاش در سیستم از قبیل تغییر در سرعت محور و یا تغییر در بار، سبب می‌شود که محور در موقعیت ثابتی قرار نگیرد و سیستم یاتاقان، حالت دینامیکی به خود بگیرد. برای تحلیل یاتاقان‌های گازی غیر مدور، هر یک از لب‌های آن به صورت یک جزء مستقل در نظر گرفته شده و معادلات حاکم برای آن نوشته می‌شود. به منظور عمومیت دادن تحلیل برای کلّ هندسه‌ی یاتاقان غیر مدور، هندسه‌ی فیلم سیال، نسبت به دستگاه مختصات عبوری از مرکز یاتاقان، مطابق شکل (۲) در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۲ نمایش هندسی یک یاتاقان غیر مدور سه لب

ضخامت فیلم سیال در فضای لقی هر لب با قرارگیری محور در یک حالت چرخش گذرا به صورت زیر بیان می‌شود [6]:

$$h_k = \frac{1}{\delta} - (X_j)\cos\theta - (Y_j)\sin\theta + (\frac{1}{\delta} - 1)\cos\left(\theta - \theta_0^k\right) \quad (1)$$

و

$$h_{0k} = \frac{1}{\delta} - (X_{j0})\cos\theta - (Y_{j0})\sin\theta + (\frac{1}{\delta} - 1)\cos\left(\theta - \theta_0^k\right) \quad (2)$$

که در آن، h_{0k}؛ ضخامت فیلم سیال در حالت پایدار می‌باشد. (X_{j0}, Y_{j0}) و (X_j, Y_j)؛ به ترتیب مختصات مرکز محور در حالت پایدار و دینامیکی می‌باشند. δ شدت غیر مدور بودن یاتاقان، به معنی نسبت کوچک‌ترین فضای لقی یاتاقان به فضای لقی آن، موقعی که محور و یاتاقان هم مرکز باشند، تعریف می‌شود. همچنین θ_0^k زاویه‌ای است که خط المرکزین یاتاقان و لب k ام با جهت مثبت محور x می‌سازد. معادله‌ی فشار حاکم در حالت آرام و یکنواخت در میدان جریان هم‌دما برای هر یک از لب‌های یاتاقان به صورت زیر بیان می‌شود [9]:

$$\frac{\partial}{\partial\theta}\left\{h^3(P+1)\frac{\partial P}{\partial\theta}\right\} + \frac{\partial}{\partial\xi}\left\{h^3(P+1)\frac{\partial P}{\partial\xi}\right\} = \Lambda\left[U\frac{\partial}{\partial\theta} + 2\frac{\partial}{\partial t}\right]\{(P+1)h\} \quad (3)$$

این معادله در جهت θ و در راستای محور طولی یاتاقان (ξ) نوشته شده است. t, U, P؛ به ترتیب اشاره به متغیر فشار، سرعت و زمان دارند. Λ؛ عدد بدون بعدی است که آن را عدد تراکم پذیری یا عدد یاتاقان می‌نامند و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Lambda = \frac{6\mu\omega R^2}{P_a C_m^2} \quad (4)$$

که در آن، μ لزجت روانکار، ω سرعت زاویه‌ای محور، R شعاع محور، P_a فشار محیط، C_m کمترین مقدار فضای لقی بین یاتاقان و محور را موقعی که آن‌ها هم مرکز باشند، بیان می‌کنند.

شرایط مرزی حاکم بر مسأله به صورت زیر می‌باشد:

$$P(\theta_1^k, \xi, t) = P(\theta_2^k, \xi, t) = P(\theta, \mp\lambda, t) = 0 \quad (5)$$

که در آن، θ_1^k و θ_2^k به ترتیب زوایای شروع و پایان هر یک از لب‌ها هستند و λ نسبت طول یاتاقان به قطر آن است. به منظور بیان حالت دینامیکی در میدان جریان، فرض می‌شود که حرکت چرخشی محور، تناوبی بوده و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$X' = \mathrm{Re}(|X'|e^{i\gamma t}) \quad , \quad Y' = \mathrm{Re}(|Y'|e^{i\gamma t}) \quad (6)$$

که در آن، Y' و X'؛ مختصات اغتشاش محور است که از موقعیت پایدار آن اندازه گیری می‌شود. در این رابطه $|X'|, |Y'|$؛ دامنه‌ی حرکت، $j=\sqrt{-1}$ و γ؛ نسبت فرکانس چرخش محور به سرعت زاویه‌ای آن است. فرکانس چرخش، سرعت زاویه‌ای است که محور در اثر اغتشاش صورت گرفته‌شده، حول محوری که دوران دارد شروع به چرخش می‌کند.

فشار گاز به صورت مجموع فشار در حالت پایدار (P_0) و حالت دینامیکی می‌باشد. بنابراین:

$$P = P_0 + P'_x X' + P'_y Y' \quad (7)$$

که در آن:

$$P'_x = P_x + j\gamma P_{\dot{x}} \quad , \quad P'_y = P_y + j\gamma P_{\dot{y}} \quad (8)$$

مؤلفه های فشار دینامیکی مختلط هستند. همچنین P_x و P_y؛ مؤلفه‌های فشار نسبت به جابه جایی صورت گرفته شده و $P_{\dot{x}}$ و $P_{\dot{y}}$؛ مؤلفه‌های فشار نسبت به سرعت در راستای جابه جایی می‌باشند.

معادله‌ی فشار در حالت پایدار با جایگذاری رابطه (۷) در رابطه (۳) و قرار دادن $X' = Y' = 0$ در آن، به صورت زیر:

$$\frac{\partial}{\partial\theta}\left\{h_0^3(P_0+1)\frac{\partial P_0}{\partial\theta}\right\}+$$
$$\frac{\partial}{\partial\xi}\left\{h_0^3(P_0+1)\frac{\partial P_0}{\partial\xi}\right\}=\Lambda\frac{\partial}{\partial\theta}\left[(P_0+1)h_0\right]$$

(۹)

به دست می‌آید. معادلات برای P'_x و P'_y را می توان با مشتق‌گیری جزیی از معادله (۳) بر حسب x' و y' به دست آورد. بنابراین:

$$\frac{\partial}{\partial\theta}\left\{h_0^3(P_0+1)\frac{\partial P'_Z}{\partial\theta}+h_0^3\frac{\partial P_0}{\partial\theta}P'_Z-\Lambda h_0 P'_Z\right\}+$$
$$\frac{\partial}{\partial\xi}\left\{h_0^3(P_0+1)\frac{\partial P'_Z}{\partial\xi}+h_0^3\frac{\partial P_0}{\partial\xi}P'_Z\right\}-j2\gamma\Lambda h_0 P'_Z$$
$$=\frac{\partial}{\partial\theta}\left\{f(\theta)(P_0+1)(3h_0^2\frac{\partial P_0}{\partial\theta}-\Lambda)\right\}+$$
$$\frac{\partial}{\partial\xi}\left\{3h_0^2 f(\theta)\frac{\partial P_0}{\partial\xi}\right\}-j2\gamma\Lambda(P_0+1)f(\theta)$$

(۱۰)

در این رابطه، P'_Z اشاره به P'_x و P'_y دارد به طوری که:

$$P'_z=P_z+j\gamma P_{\dot z} \quad , \quad z=x,y \qquad (۱۱)$$

و

$$f(\theta)=\begin{cases}\cos\theta & \text{for } P'_x\\ \sin\theta & \text{for } P'_y\end{cases} \qquad (۱۲)$$

می‌باشند. رابطه‌ی (۹)، رابطه‌ی غیرخطی است که در آن به منظور دست‌یابی به متغیر فشار در حالت پایدار، روش نیوتن با به کارگیری تکنیک اجزا محدود [10] به کار گرفته می‌شود. معادلات با روش گالرکین [11] به شکل روابط در اجزا محدود تبدیل می‌شوند.

با حل معادله‌ی (۹) میدان فشار در حالت پایدار به دست می‌آید و از این طریق، می‌توان مشخصه‌های استاتیکی سیستم یاتاقان‌های گازی را محاسبه کرد. مشخصه های استاتیکی عبارتند از: ظرفیت تحمل بار یاتاقان(W)، زاویه‌ی مشخصه سیستم (ψ) و اتلاف انرژی ناشی از نیروی اصطکاک (P_L).

مؤلفه‌های نیروی سیال روی محور با رابطه زیر بیان می‌شوند:

$$\begin{bmatrix}F_{x0}\\F_{y0}\end{bmatrix}=\Sigma_{k=1}^{L}\begin{bmatrix}F_{x0}^k\\F_{y0}^k\end{bmatrix}$$
$$=-\Sigma_{k=1}^{L}\int_{-\lambda}^{\lambda}\int_{\theta_1^k}^{\theta_2^k}P_{0k}\begin{bmatrix}\cos\theta\\\sin\theta\end{bmatrix}d\theta\, d\xi$$

(۱۳)

همچنین ظرفیت تحمل بار و زاویه‌ی مشخصه‌ی یاتاقان هم به ترتیب به صورت:

$$W=(F_{X0}^2+F_{Y0}^2)^{1/2} \qquad (۱٤)$$

$$\psi=\arctan(X_{j0}/Y_{j0}) \qquad (۱۵)$$

و افت انرژی حاصل از اثر نیروی برشی روانکار نیز با رابطه:

$$P_L=\Sigma_{K=1}^{L}\int_{-\lambda}^{\lambda}\int_{\theta_1^k}^{\theta_2^k}(\frac{3h_{0k}}{\Lambda}\frac{\partial P_{0k}}{\partial\theta}+\frac{1}{h_{0k}})\,d\theta\, d\xi \qquad (۱٦)$$

برای یاتاقان‌های غیر مدور، تعریف می‌شوند [6]. در این روابط L تعداد لب و O حالت پایدار سیستم را بیان می‌کند. در حالت دینامیکی جهت تعیین مقدار مرز پایداری با استفاده از معادله‌ی حرکت محور و با توجه به قانون دوم نیوتن، از رابطه‌ی زیر استفاده می‌شود [9]:

$$M_C=\frac{(S_{xx}B_{yy}+S_{yy}B_{xx}-S_{xy}B_{yx}-S_{yx}B_{xy})}{\left[(B_{xx}+B_{yy})\gamma^2\right]}$$

(۱۷)

که در آن، S_{mn} و B_{mn} $(m,n=x,y)$؛ به ترتیب ضرایب سختی و میرایی فیلم سیال بوده و γ؛ نسبت فرکانس چرخشی در آستانه ناپایداری می‌باشد. همچنین M_G؛ کمیت جرم بحرانی سیستم را تعریف می‌کند که بر مبنای آن می‌توان میزان پایداری سیستم یاتاقان را بررسی نمود.

بدیهی است که گرفتن نتایج از حل معادلات مذکور با روش المان محدود، پیچیده، زمان بر و همراه با فرضیات می‌باشد [7,12,13]. حال آن‌که روش

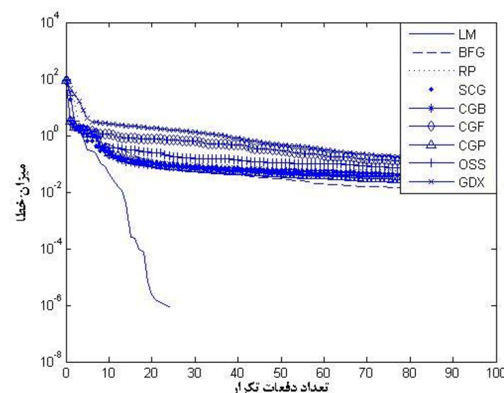
شبکه‌های عصبی به مدل ریاضی محض نیاز ندارد، بلکه مانند انسان قابلیت یادگیری به وسیله‌ی تعداد مشخصی مثال را دارد. از جمله مزایای این روش، کاهش حجم محاسبات، سرعت و توانایی یادگیری و همچنین کارایی آن در تحلیل مسائل چند بعدی پیچیده می‌باشد.

شبکه‌های عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی، روشی برای پردازش اطلاعات می باشد که در طراحی آن از سیستم‌های عصبی زنده، مانند مغز الگو برداری شده است.

شبکه های عصبی مانند بشر به وسیله‌ی مثال، آموزش دیده و برای انجام وظیفه خاصی طراحی می‌شوند [14].

انتخاب الگوریتم آموزشی مناسب. در این مقاله برای طراحی بهینه هر شبکه، کارایی الگوریتم‌های آموزشی مختلف در این زمینه، مورد مقایسه و بررسی قرار می‌گیرد. جهت تشخیص تفاوت الگوریتم‌های مختلف به صورت شهودی، نمودار کارایی شبکه (میزان خطای شبکه بر حسب تعداد دفعات تکرار دوره آموزش) به ازای هر الگوریتم آموزشی با استفاده از برنامه نویسی در محیط نرم افزاری مطلب، بعد از آموزش با هر الگوریتم رسم می‌شود. برای نمونه در شکل (۳) مقایسه کارایی شبکه طراحی‌شده با ساختار (۱-۱۸-۱۹) به ازای الگوریتم‌های آموزشی مختلف، آورده شده است.



شکل ۳ مقایسه‌ی کارایی شبکه برای الگوریتم‌های آموزشی مختلف

با توجه به شکل (۳)، مشاهده می‌گردد که الگوریتم لونبرگ- مارکوارت (Levenberg-Marquardt Algorithm-) (LM)، سریع‌ترین روش حل برای استفاده در شبکه مذکور می‌باشد که این نمودار، بهترین نمونه است که تفاوت شاخص را نشان می‌دهد و بدیهی است که بقیه نمودارها به این نحو نباشند. با بررسی و رسم نمودار کارایی تمامی شبکه‌های عصبی طراحی شده، مشخص گردید که الگوریتم LM سریع‌ترین و مناسب‌ترین الگوریتم آموزشی جهت استفاده در کار حاضر می‌باشد. در واقع الگوریتم LM، توسعه یافته الگوریتم‌های دیگر بوده و مهمترین حسن آن، افزایش سرعت همگرایی است [15]. برای طراحی شبکه بهینه، بایستی زمان اجرای برنامه و میانگین خطا نیز، مورد محاسبه قرار گیرد.

الگوریتم آموزشیLM . روش یادگیری LM، برای هر شبکه چند لایه که از توابع محرک مشتق پذیر و روش آموزش با ناظر استفاده می‌کند، می‌تواند به کار برده شود. قبل از استفاده از این الگوریتم، ماتریس وزن های تمام لایه ها به صورت تصادفی و با مقادیر کوچک، مقداردهی می‌شود. سپس بردارهای ورودی به شبکه وارد و خروجی آن محاسبه می‌گردد. خروجی محاسبه شده با خروجی مطلوب، مقایسه و مقدار خطای به دست آمده به عنوان معیاری جهت تنظیم وزن‌ها استفاده می‌شود [17و۱٦]. براساس این الگوریتم، خطای محاسبه شده در هر لایه برای تنظیم وزن های لایه مخفی قبل از آن استفاده می‌شود. این عملیات به طور متوالی تا تنظیم وزن‌های اولین لایه‌ی مخفی، ادامه پیدا می‌کند. فرآیند آموزش و تنظیم وزن ها تا رسیدن به مقدار مشخصی از خطا تکرار می‌شود. به فرآیند اعمال تمامی الگوهای آموزشی جهت تنظیم وزن‌ها در هر مرحله، یک تکرار گفته می‌شود.

طراحی شبکه مناسب. هدف مقاله، طراحی شبکه‌هایی

است که با داشتن عدد تراکم پذیری و نسبت خارج از مرکزی و ابعاد یاتاقان به عنوان پارامترهای متنوع ورودی، مشخصه‌های استاتیکی چون مقادیر زاویه‌ی مشخصه، ظرفیت تحمل بار یاتاقان، اتلاف انرژی و همچنین مشخصه‌ی دینامیکی بسیار مهمی چون میزان پایداری یاتاقان را برای انواع یاتاقان‌ها محاسبه و پیش بینی نماید. از آن‌جا که در زمینه شبکه‌های عصبی مصنوعی، شبکه MLP (Multi Layer Perceptron) با دو لایه که تابع انتقال اولین لایه، سیگموییدی و تابع انتقال دومین لایه، خطی باشد به شرط آن‌که تعداد سلول‌های کافی در لایه‌ها به کار گرفته شود، می‌تواند هر تابع خطی را با دقت دلخواه تقریب بزند و از طرفی مطالعات شبیه سازی نشان می‌دهد، استفاده از شبکه MLP سه لایه به جای دو لایه بر سرعت یادگیری افزوده و حجم حافظه کمتری مورد نیاز است [15]، لذا در کار حاضر از شبکه‌های MLP سه لایه با توابع انتقال تانژانت سیگموییدی و خطی استفاده می‌گردد. در این راستا، چهار شبکه‌ی عصبی MLP سه لایه با ساختارهای متنوع (۱- ۱۸- ۱۹)، (۱- ۱۰- ۱۰)، (۱-۷- ۸)، طبق مشخصات جدول (۱)، با استفاده از الگوریتم آموزشی لونبرگ- مارکوارت به کار گرفته می‌شود که این ساختارها بهترین حالت‌های ممکن برای پیش بینی شبکه در مورد پارامترهای مختلف هدف را میسر می‌سازند.

همچنین تعداد سلول‌های هر لایه با توجه به نحوه‌ی پخش شدن نمونه های ورودی در فضای ویژگی‌ها، معیار میانگین خطا، مدت زمان پاسخ شبکه و آزمون و خطا تعیین می‌شود. با توجه به تجربیات قبلی و توضیحات فوق، توابع انتقال برای لایه های اول و دوم تابع تانژانت سیگموییدی و برای لایه آخر تابع خطی انتخاب می‌گردد و معیار خطا نیز، معیار میانگین مربعات خطا (MSE= ۰/۰۰۰۱) در نظر گرفته می‌شود.

نتایج و بحث

بررسی نتایج مربوط به پارامترهای ظرفیت تحمل بار و زاویه مشخصه. در این بخش، اثراتی که عدد تراکم پذیری و نسبت خارج از مرکزی یاتاقان بر مشخصه‌های استاتیکی سیستم یاتاقان‌های گازی مدور و غیر مدور دو لب، سه لب و چهار لب می‌توانند داشته باشند، مورد بررسی قرار گرفته است. برای یاتاقان گازی مدور مقدار δ =۱ و برای یاتاقان‌های گازی غیر مدور مقدار ۰/۵= δ و همچنین برای هر چهار نوع یاتاقان ۱ = λ، در نظر گرفته شده است [6].

جدول‌های (۲) تا (۵)، نتایج آموزش و تست شبکه‌های عصبی طراحی شده در این بخش را در مقایسه با نتایج به دست آمده در مرجع [6] نشان می‌دهند. بررسی نتایج، گویای عملکرد صحیح روش شبکه‌های عصبی مصنوعی، برای دستیابی مطلوب به پارامترهای مورد نظر در حالت‌های مختلف است.

جدول ۱ مشخصات ساختارهای مختلف شبکه

ساختار شبکه	نوع ورودی	نوع خروجی	تعداد داده آموزش	تعداد داده تست	خطا
۱-۱۸-۱۹	ε و Λ و L	Ψ	**۳۸**	**۷**	**۰/۰۰۳٤**
۱-۱۰-۱۰	λ و Λ و L	PL	**۲۰٦**	**۲۲**	**۰/۰۰۳۷**
۱-۱۰-۱۰	λ و Λ و L	Mc	۱۸۷	۲۰	۰/۰۰۵۹
۱-۷-۸	ε و Λ و L	W	۳۸	۷	۵/۰۹۳۹e -۰۰٤

جدول ٢ نتایج آموزش شبکه برای یاتاقان گازی مدور

Λ	ε	* Ψ(FEM)	Ψ(ANN)	٪ Error	* W(FEM)	W(ANN)	٪ Error
٠/٦	٠/١	٨٠/١٤	٨٠/١١٣٦	٠/٠٣٢٩	٠/٠٨٨٢	٠/٠٨٨٣	٠/١١٣٤
	٠/٢	٧٩/١٨	٧٩/١٢٨١	٠/٠٦٥٥	٠/١٨٠٣	٠/١٨٠٣	٠
	٠/٤	٧٤/٥٥	٧٤/٥٥٦٩	٠/٠٠٩٢	٠/٣٩٧٧	٠/٣٩٧٩	٠/٠٥٠٣
	٠/٦	٦٣/٣١	٦٣/٣١١٣	٠/٠٠٢٠	٠/٧٣٣٢	٠/٧٣٣١	٠/٠١٣٦
	٠/٨	٤٠/١٣	٤٠/١٢٩٧	٠/٠٠٠٧	١/٦١٠٤	١/٦١٠٥	٠/٠٠٦٢
٣	٠/١	٤٩/٦٢	٤٩/٦٢	٠	٠/٣٣٩٨	٠/٣٤١٧	٠/٥٥٩١
	٠/٢	٤٧/٨٨	٤٧/٨٧٣٤	٠/٠١٣٨	٠/٦٩٢٥	٠/٦٨٩٢	٠/٤٧٦٥
	٠/٤	٤١/١٧	٤١/١٧٨١	٠/٠١٩٧	١/٥٢٠٩	١/٥٢٢٤	٠/٠٩٨٦
	٠/٦	٣٠/٩٩	٣٠/٩٩٠٦	٠/٠٠١٩	٢/٨٤٥٥	٢/٨٤٥١	٠/٠١٤٠
	٠/٨	١٨/٧٥	١٨/٧٥٣٦	٠/٠١٩٢	٦/١٤٥٧	٦/١٤٥٦	٠/٠٠١٦
١٢	٠/١	١٨/٥٣	١٨/٥٣	٠	٠/٥١٤٩	٠/٥١٣٥	٠/٢٧١٩
	٠/٢	١٧/٨٢	١٧/٨١٩٤	٠/٠٠٣٤	١/٠٧٢٧	١/٠٧٤٤	٠/١٥٨٥
	٠/٤	١٥/٢٤	١٥/٢٣٩٧	٠/٠٠١٩	٢/٥٢٩٩	٢/٥٢٩٦	٠/٠١١٨
	٠/٦	١١/٦٤	١١/٦٣٩٦	٠/٠٠٣٤	٥/٠٨٢٧	٥/٠٨٢٦	٠/٠٠١٩
	٠/٨	٧/٣٦	٧/٣٥٩٩	٠/٠٠١٣	١١/٣٣٦٧	١١/٣٣٦١	٠/٠٠٥٣

*مقادیر از مرجع [6]

جدول ٣ نتایج آموزش شبکه برای یاتاقان گازی غیر مدور دو لب

Λ	ε	* Ψ (FEM)	Ψ(ANN)	٪ Error	* W (FEM)	W(ANN)	٪ Error
٢	٠/٢٠	٧٦/٦	٧٦/٦٠٠٠	٠	٠/١٧١٨	٠/١٧٢٤	٠/٣٤٩٢
	٠/٤٠	٧٥/١	٧٥/١٠٠٢	٠/٠٠٠٣	٠/٣٦٧١	٠/٣٦٦٤	٠/١٩٠٧
	٠/٦٠	٧١/٥	٧١/٤٩٩٩	٠/٠٠٠١	٠/٦٣١٠	٠/٦٣١١	٠/٠١٥٨
	٠/٨٠	٥٨/٣	٥٨/٣٠١٣	٠/٠٠٢٢	١/٢٢١٠	١/٢٢١١	٠/٠٠٨٢
	٠/٩٠	٣٤/١	٣٤/١٠٣٢	٠/٠٠٩٤	٢/٧٩٥٠	٢/٧٩٥٢	٠/٠٠٧١
٤	٠/٢٠	٦٢/٥	٦٢/٤٩٩٤	٠/٠٠٠٩	٠/٣٨٩٨	٠/٣٨٩٩	٠/٠٢٥٦
	٠/٤٠	٥٨/٩	٥٨/٨٩٩٠	٠/٠٠١٧	٠/٨٥٤٤	٠/٨٥٤٢	٠/٠٢٣٤
	٠/٦٠	٥٠/٢	٥٠/٢٠٣٠	٠/٠٠٥٩	١/٥٧٢	١/٥٧٢١	٠/٠٠٦٤
	٠/٨٠	٣١/٣	٣١/٢٩٦٣	٠/٠٠٠١	٣/٤٤٤	٣/٤٤٤٠	٠
	٠/٩٠	–	٢٢/٦٨٣٥	–	–	٥/٠٠٧٩	–
١٢	٠/٢٠	٣٠/٢	٣٠/١٩٩٦	٠/٠٠١٣	١/٠٥٣	١/٠٥٤٠	٠/٠٩٤٩
	٠/٤٠	٢٦/٩	٢٦/٨٩٩٧	٠/٠٠١١	٢/٢٩٤	٢/٢٩٢٨	٠/٠٥٢٣
	٠/٦٠	٢١/٥	٢١/٤٩٩٤	٠/٠٠٢٨	٤/١٢٤	٤/١٢٤٣	٠/٠٠٧٣
	٠/٨٠	–	٥/٠٤٥١	–	–	٨/٩٥٧٦	–

جدول ٤ نتایج آموزش شبکه برای یاتاقان گازی غیر مدور سه لب

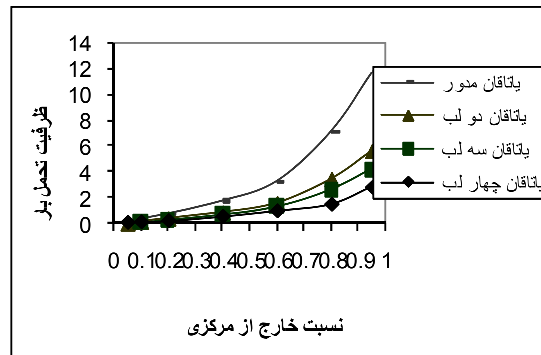
Λ	ε	* Ψ(FEM)	Ψ(ANN)	% Error	* W(FEM)	W(ANN)	% Error
٢	۰/٢۰	٦٨/٦	٦٨/٥٩٩٧	۰/۰۰۰٤	۰/١٧٤٨	۰/١٧٤٤	۰/٢٢٨٨
	۰/٤۰	٦٧/١	٦٧/١۰۰۰	۰	۰/٣٨۰٢	۰/٣٨۰۰	۰/۰٥٢٦
	۰/٦۰	٦٢/٧	٦٢/٧۰۰٣	۰/۰۰۰٥	۰/٦٧٩٨	۰/٦٧٩٣	۰/۰٧٣٥
	۰/٨۰	٥٤/٦	٥٤/٦۰١۰	۰/۰۰١٨	١/٢٨٧٩	١/٢٨٧٦	۰/۰٢٣٣
٤	۰/٢۰	٥٦/٢	٥٦/١٩٧٨	۰/۰۰٣٩	۰/٣٣٥٦	۰/٣٣٥٣	۰/۰٨٩٤
	۰/٤۰	٥٥/٤	٥٥/٤۰۰٢	۰/۰۰۰٣	۰/٧٤١٨	۰/٧٤١٩	۰/۰١٣٥
	۰/٦۰	٥١/٦	٥١/٦۰١٦	۰/۰۰٣١	١/٣٤٦۰	١/٣٤٥٦	۰/۰٢٩٧
	۰/٨۰	٤٢/١	٤٢/١۰٢٤	۰/۰۰٥٧	٢/٦٥٤۰	٢/٦٥٣٧	۰/۰١١٣
١٢	۰/٢۰	٤٣/٥	٤٣/٥۰۰٢	۰/۰۰۰٤	۰/٦٨٩٨	۰/٦٨٩٦	۰/۰٢٨٩
	۰/٤۰	٤٢/٨	٤٢/٧٩٩٤	۰/۰۰١٤	١/٥٣٩	١/٥٣٩٣	۰/۰١٩٥
	۰/٦۰	٣٩/٤	٣٩/٣٩٩٥	۰/۰۰١٣	٢/٧٨٢	٢/٧٨١٨	۰/۰۰٧٢
	۰/٨۰	–	٣٤/٧٧٧١	–	–	٦/٨٨٩٢	–

علامت – در جداول (٣) و (٤) نشان‌دهنده آن است که این نتایج قبلا گزارش نشده است.

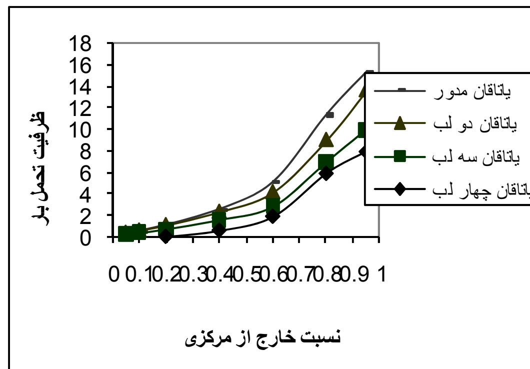
جدول ٥ نتایج تست شبکه برای یاتاقان گازی غیر مدور چهار لب

Λ	ε	* Ψ(FEM)	Ψ(ANN)	٪ Error	* W(FEM)	W(ANN)	٪ Error
۰/١	۰/٢٤	٨٩	٨٨/٩٦	١/۰٧٨٦	۰/۰١	۰/۰١۰	۰
۰/٥	۰/٢٣٩	٨٤/٣	٨٤/٢٧	۰/۰٣٥٦	۰/۰٥	۰/۰٥١	٢
١	۰/٢٣٩	٧٨/٨	٧٨/٧٥	۰/۰٦٣٤	۰/١	۰/١۰١	١
٢	۰/٢٤٤	٦٩/٥	٦٩/٥١	۰/۰١٤٤	۰/٢	۰/٢۰١	۰/٥۰۰۰
٥	۰/٢٨١	٥٥/٤	٥٥/٤٢	۰/۰٣٦١	۰/٥	۰/٥۰٢	۰/٤۰۰۰
١۰	۰/٣٦٩	٤٨/٧	٤٨/٧۰	۰	١	١/۰۰٤	۰/٤۰۰۰
٢۰	۰/٥٤٢	٤٣/٩	٤٣/٨٨	۰/۰٤٥٥	٢	٢/۰۰٤	۰/٢۰۰۰

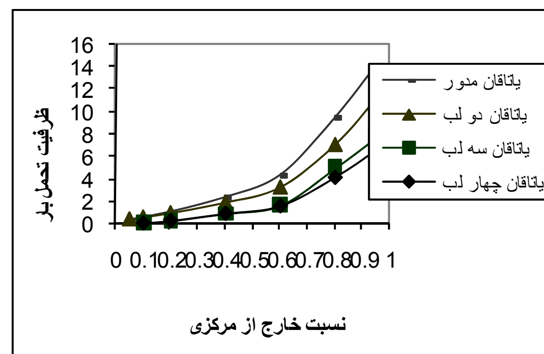
همان‌طور که از نتایج جداول فوق مشخص است برای حالت‌هایی نیز که از روش اجزا محدود در مرجع [6]، جوابی گزارش نگردیده، در این مقاله جواب‌های قابل قبول با روند منطقی، ارائه شده است. پس از آموزش شبکه و مقایسه‌ی نتایج موجود در جداول (٢) تا (٥) برای سنجش میزان همگرایی بین نتایج حاصل از آموزش شبکه و داده‌های تست و اطمینان از صحت کارکرد شبکه‌های عصبی طراحی شده، نتایج جدید بدست آمده با استفاده از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی در رابطه با انواع متداول یاتاقان‌های گازی، در ادامه آورده می‌شوند. شکل‌های (٤) تا (٦)، اثر پارامتر نسبت خارج از مرکزی را بر ظرفیت تحمل بار هر چهار نوع یاتاقان گازی مورد بررسی در کار حاضر، نشان می‌دهند.



شکل ٤ اثر نسبت خارج از مرکزی بر ظرفیت تحمل بار یاتاقان‌های گازی مختلف در عدد یاتاقان ٤



شکل ٦ اثر نسبت خارج از مرکزی بر ظرفیت تحمل بار یاتاقان‌های گازی مختلف در عدد یاتاقان ١٢



شکل ٥ اثر نسبت خارج از مرکزی بر ظرفیت تحمل بار یاتاقان‌های گازی مختلف در عدد یاتاقان ٨

از شکل‌های (٤) تا (٦)، مشهود است که دامنه‌ی تغییرات ظرفیت تحمل بار، به ترتیب از یاتاقان گازی مدور تا یاتاقان گازی غیرمدور چهار لب، کاهش می‌یابد که علت آن را می‌توان در تغییر شکل هندسی و افزایش تعداد لب‌ها دانست. نتایج جدید شبکه‌های عصبی در مورد زاویه‌ی مشخصه برای یاتاقان‌های گازی مختلف، در جداول (٦) و (٧) آمده است.

جدول ٦ نتایج مربوط به مقادیر زاویه مشخصه برای یاتاقان گازی مدور

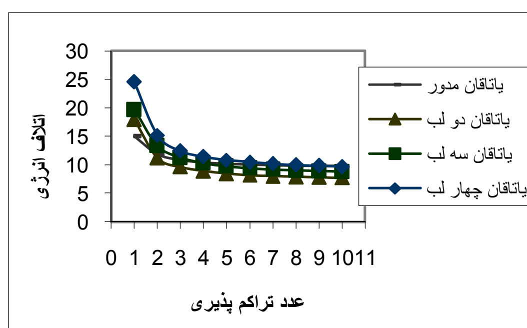
نوع یاتاقان	ε	Ψ در Λ=٨	Ψ در Λ=١٢	Ψ در Λ=١٥
مدور	٠/٠٥	٤٠/٢٣٨٦	٢٠/١٠٩٤	١٤/٨٠٢٢
	٠/٢٠	٣٥/١٠٢٨	١٧/٨١٩٤	١٢/٨٠٩٨
	٠/٤٠	٢٧/٨٧٧٧	١٥/٢٣٩٧	١٠/٥٢٢٢
	٠/٦٠	١٨/٩٧٢٩	١١/٦٣٩٦	٩/٩٢٧٠
	٠/٧٠	١٠/٨٨٧٥	٩/٣١١٠	٨/٨٤٤٧
	٠/٩٥	٤/٦٤٩	٤/٠٥٣٥	٣/٦٥٥١

جدول ۷ نتایج مربوط به مقادیر زاویه مشخصه برای انواع یاتاقان‌های گازی غیر مدور

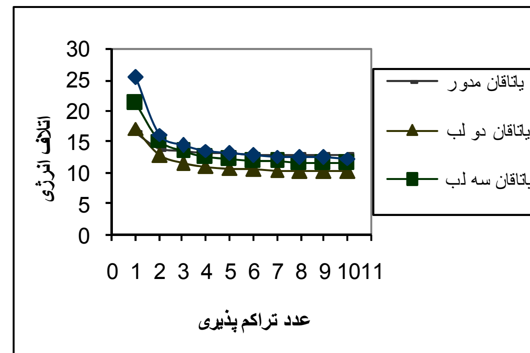
نوع یاتاقان	ε	Ψ در Λ=۸	Ψ در Λ=۱۲	Ψ در Λ=۱۵
دو لب	۰/۰۵	٤٥/٦۰٧۰	٣٧/٦٤٢٤	٢٥/٥٥٩٢
	۰/۱۰	٤٤/٨٨٨٥	٣٥/٥١٤٧	٢٥/٢٩٨٢
	۰/۲۰	٤٤/۰٥٤١	٣۰/١٩٩٦	٢٤/٢٥٦٤
	۰/٤۰	٤٤/۰٨٧٨	٢٦/٨٩٩٧	١٢/١٦٤٦
	۰/٦۰	٢٢/٧٢٥٨	٢١/٤٩٩٤	١۰/٢۰۰٥
	۰/٧۰	١٦/٢٢٢٣	١٤/١٧٥٩	٨/٩٩٤٢
	۰/٩٥	١٤/١١۰١	–	٣/٧٨٥٣
سه لب	۰/۰٥	٥٤/١٩٦٦	٤٥/٢۰٣٢	٣٩/٣٤٧٦
	۰/۱۰	٥٤/۰٥٣٨	٤٤/٤٧۰٤	٣٩/١٩٨٢
	۰/۲۰	٥٣/٣٣١٣	٤٣/٥۰۰٢	٣٤/٤٨١٤
	۰/٤۰	٤٩/۰۰٥٨	٤٢/٧٩٩٤	٢٧/٩١٨٧
	۰/٦۰	٤٤/۰۰٢۰	٣٩/٣٩٩٥	٢٦/٩٥۰٤
	۰/٧۰	٤٢/٢٧٧۰	٣٦/٧٩٥٦	٢٦/٤٥٦٣
	۰/٩٥	٣٣/۰٣٦٦	٣١/٧٦٨١	١٧/٢٤٢٥
چهار لب	۰/۰٥	٥٤/٣٧٧٨	٥٤/١٩٩٩	٤٨/٤٩٥٩
	۰/۱۰	٥٤/٣٧٧٣	٥٤/۰٥٩٩	٤٧/٢١٢١
	۰/۲۰	٥٤/٣٧٤٦	٥٣/٣٥٢١	٤٤/٦٧٢٨
	۰/٤۰	٥٤/٣٤٣١	٤٩/۰۰٣٣	٤٢/١۰٧٦
	۰/٦۰	٥٤/۰٤٩٧	٤٣/٩٥٧٥	٤١/١٣٢٤
	۰/٧۰	٥٣/٣٤٢٤	٤٢/٩٥٤٢	٣٨/٩٢٧٧
	۰/٩٥	٤٧/٣٧٢٥	٣٩/٥۰٢٩	٣٦/٢٢١۰

همان‌گونه که از جدول‌های (٦) و (٧) مشخص است، با افزایش در تعداد لب‌ها، زاویه مشخصه یاتاقان نیز زیاد می‌شود که گویای پایداری یاتاقان‌های با تعداد لب‌های بیشتر است.

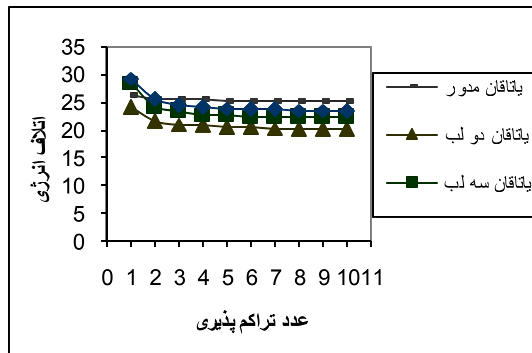
بررسی نتایج مربوط به پارامترهای اتلاف انرژی و میزان پایداری. تأثیر عدد تراکم پذیری بر روی میزان اتلاف انرژی یاتاقان‌های گازی مختلف، برای نسبت‌های طول به قطر متنوع، در شکل‌های (٧) تا (١۰) مشاهده می‌شود.



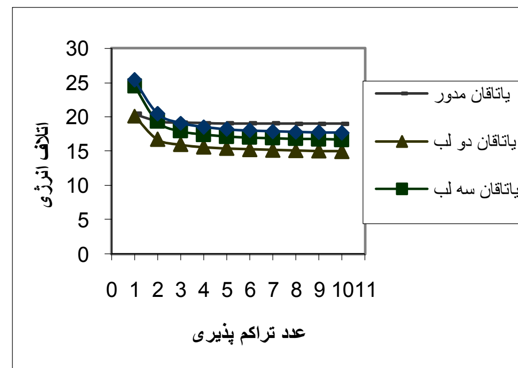
شکل ٧ اثر عدد تراکم پذیری بر روی میزان اتلاف انرژی یاتاقان‌های گازی مختلف در $\lambda = ۰/٧٥$



شکل ۸ اثر عدد تراکم پذیری بر روی میزان اتلاف انرژی یاتاقان‌های گازی مختلف در $\lambda = ۱$



شکل ۱۰ اثر عدد تراکم پذیری بر روی میزان اتلاف انرژی یاتاقان‌های گازی مختلف در $\lambda = ۲$

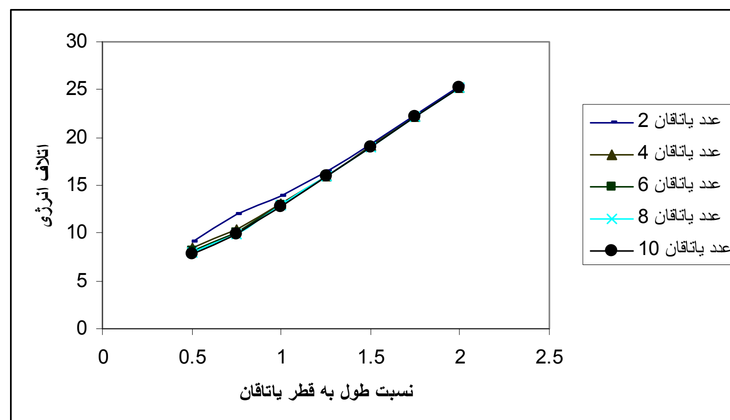


شکل ۹ اثر عدد تراکم پذیری بر روی میزان اتلاف انرژی یاتاقان‌های گازی مختلف در $\lambda = ۱/۵$

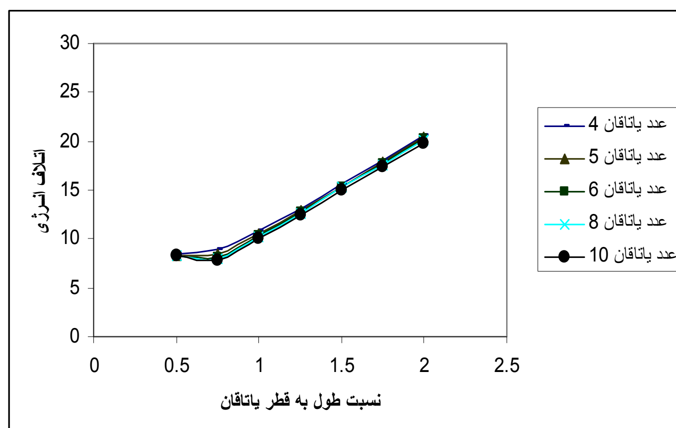
از بررسی نتایج نشان داده شده در شکل‌های (۷) تا (۱۰) می‌توان نتیجه گرفت کـه بـا افـزایش در مقـدار عدد تراکم پذیری، میزان اتلاف انرژی در انواع مختلـف یاتاقان‌های گازی کاهش می‌یابد.

اثر ابعاد یاتاقان بر روی میزان اتـلاف انـرژی، در اعداد تراکم پذیری متفاوت، در شکل‌های (۱۱) تا (۱٤) برای یاتاقان‌های گازی مختلف بررسی شده است.

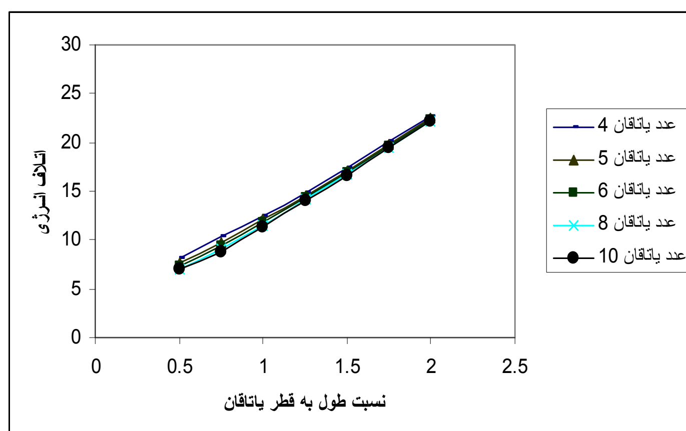
از شکل‌های (۱۱) تا (۱٤)، واضح اسـت کـه بـا افزایش در مقدار ابعاد انواع یاتاقان‌هـای گـازی، میـزان اتلاف انرژی در سیستم یاتاقان نیز افزایش می‌یابد.



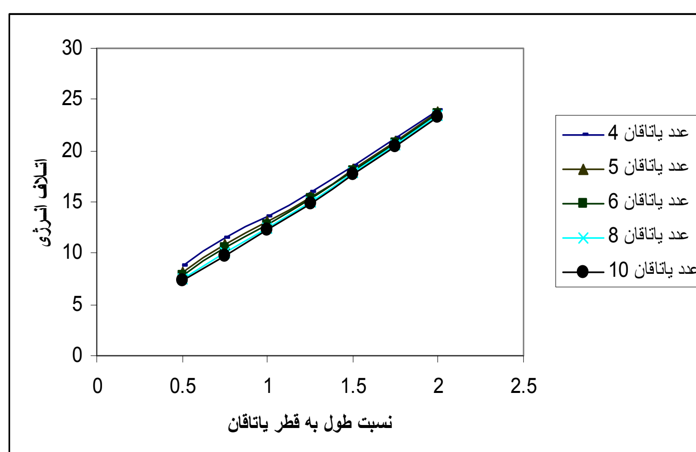
شکل ۱۱ اثر ابعاد بر روی میزان اتلاف انرژی یاتاقان گازی مدور



شکل ۱۲ اثر ابعاد بر روی میزان اتلاف انرژی یاتاقان گازی غیر مدور دو لب

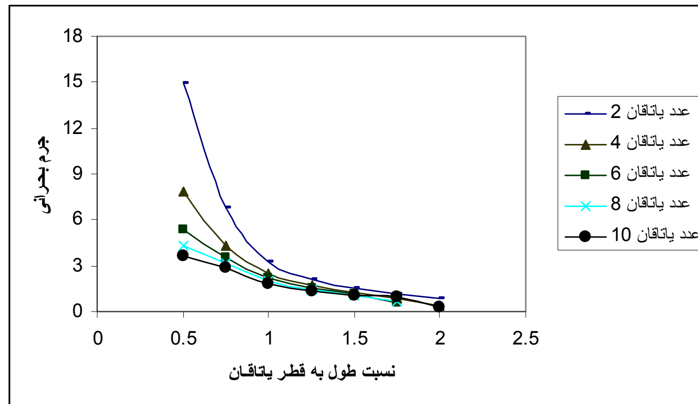


شکل ۱۳ اثر ابعاد بر روی میزان اتلاف انرژی یاتاقان گازی غیر مدور سه لب

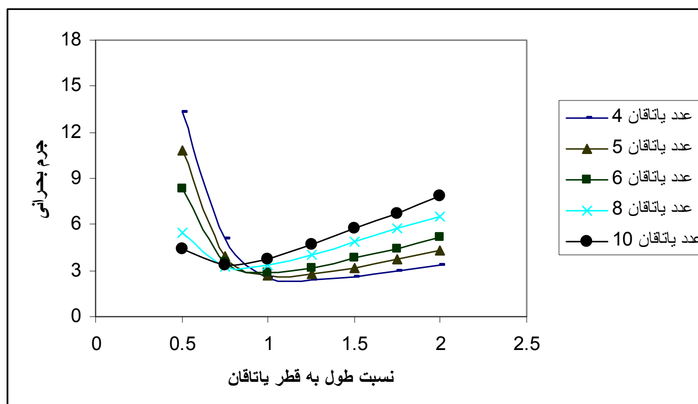


شکل ۱٤ اثر ابعاد بر روی میزان اتلاف انرژی یاتاقان گازی غیر مدور چهار لب

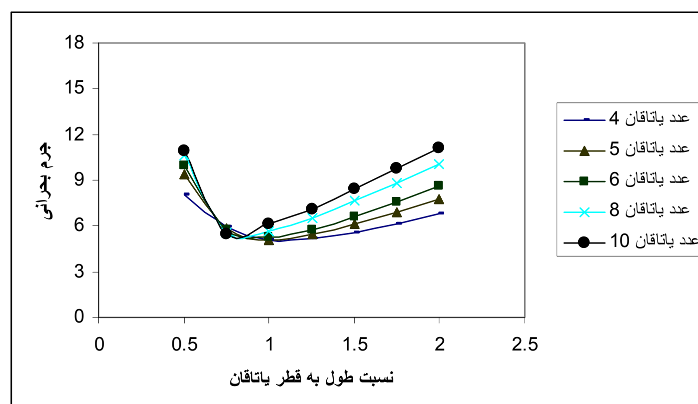
در شکل‌های (۱۵) تا (۱۸) اثر ابعاد یاتاقان بـر روی میزان پایداری، در اعداد تـراکم پـذیری مختلـف، بـرای یاتاقان‌های گازی متداول به صورت مجزا مورد بررسـی قرار گرفته است.



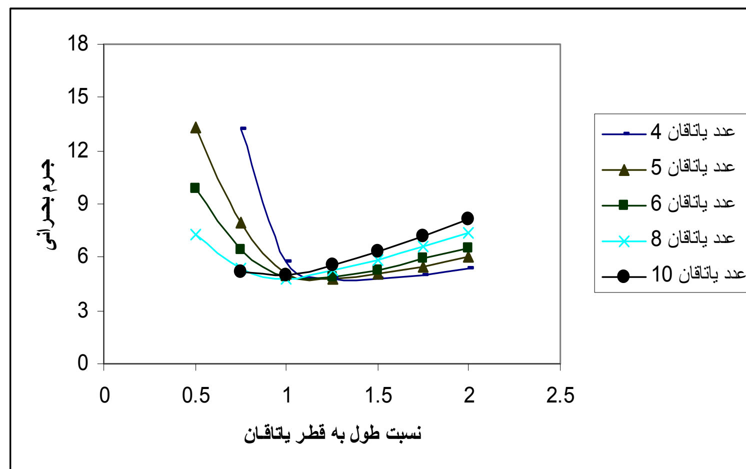
شکل ۱۵ اثر ابعاد بر روی پایداری یاتاقان گازی مدور



شکل ۱٦ اثر ابعاد بر روی پایداری یاتاقان گازی غیر مدور دو لب



شکل ۱۷ اثر ابعاد بر روی پایداری یاتاقان گازی غیر مدور سه لب

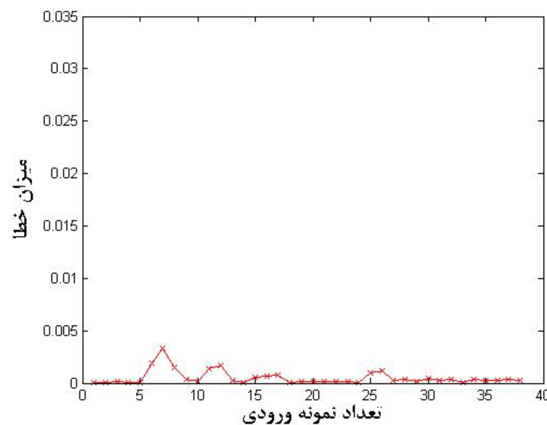


شکل ۱۸ اثر ابعاد بر روی پایداری یاتاقان گازی غیر مدور چهار لب

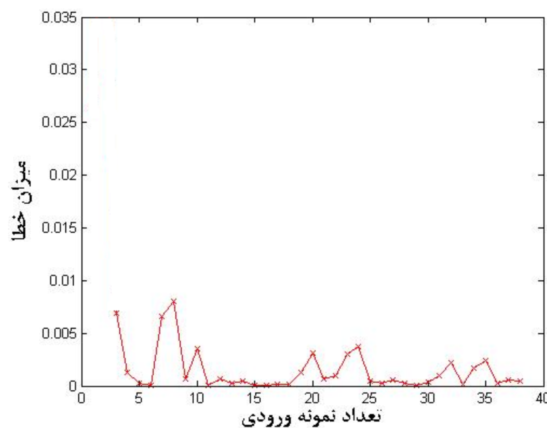
مطابق با شکل‌های (۱۵) تا (۱۸) هر سه نوع یاتاقان غیر مدور دو لب، سه لب و چهار لب در محدوده $\lambda = ۱$ پایین‌ترین میزان پایداری را دارا هستند؛ به نحوی که با کاهش یا افزایش این مقدار، ناحیه‌ی پایداری سیستم افزایش می‌یابد. همچنین از شکل (۱۵) مشخص است که برای یاتاقان گازی مدور با افزایش در مقدار λ، میزان پایداری کمتر می‌گردد. از ویژگی‌های بارز مقاله حاضر این است که برای آموزش شبکه فقط از داده‌های سه نوع یاتاقان مدور و غیر مدور دو لب و سه لب استفاده شده است و با این وجود برای یاتاقان چهار لب نیز جواب‌های قابل قبول از برنامه‌ها گرفته شده است.

شکل‌های (۱۹) و (۲۰)، نمودار میزان خطای شبکه بر اساس نمونه های ورودی اعمال شده، برای دو نمونه ساختار طراحی شده شبکه، جهت پیش بینی ظرفیت تحمل بار و مقدار زاویه مشخصه یاتاقان‌های گازی را نشان می‌دهند.

شکل (۱۹) نشان می‌دهد برای آن‌که از آموزش شبکه اطمینان حاصل گردد، تعداد نمونه‌های یادگیری می‌بایست بیش از ۲۷ نمونه باشد؛ در این صورت می‌توان مطمئن بود که به تعداد کافی نمونه به شبکه نشان داده شده است و شبکه موفق شده است سیستم حاکم بر مساله را به خوبی مدل‌سازی نماید. در مورد شکل (۲۰) نیز به همین نحو، شبکه‌ی مورد نظر به بیش از ۳۵ نمونه جهت مدل‌سازی مطلوب مسأله نیاز دارد؛ از طرفی چنان که مشخص است، خطا برای هر دو نمونه ساختار استفاده شده در شبکه، بسیار ناچیز است که حاکی از طراحی مطلوب و بهینه‌ی ساختارهای شبکه و عملکرد قابل قبول برنامه‌های کامپیوتری نوشته شده، می‌باشد. همچنین نتایج مربوط به میزان خطا و مدت زمان اجرای برنامه با Intel 2.8 GHz، برای هر چهار ساختار به کار رفته در شبکه، در جدول (۸) آمده است.



شکل ۱۹ نتایج خطای مربوط به ساختار شبکه پیش بینی ظرفیت تحمل بار بر اساس تعداد نمونه ورودی



شکل ۲۰ نتایج خطای مربوط به ساختار شبکه پیش بینی مقدار زاویه‌ی مشخصه بر اساس تعداد نمونه ورودی

جدول ۸ نتایج میزان خطا و مدت زمان اجرای برنامه برای ساختارهای مختلف شبکه

نوع ساختار شبکه	میانگین مدت زمان اجرا برنامه	میزان خطای برنامه
پیش‌بینی ظرفیت تحمل بار	۱/۸ ثانیه	۵/۰۹۳۹e −۰۰٤
پیش‌بینی زاویه مشخصه	۳/۱ ثانیه	۰/۰۰۳٤
پیش‌بینی اتلاف انرژی	۳/۲ ثانیه	۰/۰۰۳۷
پیش‌بینی پایداری	۲/۸ ثانیه	۰/۰۰۵۹

از جدول (۸) مشاهده می‌شود که خطای شبکه‌های طراحی شده بسیار مطلوب و میانگین مدت زمان اجرای برنامه ناچیز است که از مزایای این روش محاسباتی محسوب می‌گردد.

نتیجه‌گیری

۱. در بررسی حاضر، با توجه به نتایج به دست آمده، سرعت همگرایی، دقت نتایج و سادگی روش شبکه‌های عصبی مصنوعی مشخص می‌گردد.

۲. با استفاده از روش شبکه‌های عصبی، می‌توان با داشتن حداقل تعداد داده‌ها برای آموزش شبکه، نتایج جدید قابل قبولی را برای دامنه‌ای از حالت‌های مختلف به دست آورد.

۳. با توجه به تراکم‌پذیری بالای گازها و وارد شدن پارامتر زمان در حل معادلات یاتاقان‌های گازی که منجر به پیچیدگی مضاعف محاسباتی می‌شود، به‌کارگیری روش شبکه‌های عصبی جهت دستیابی به پاسخ مطلوب، در حداقل زمان محاسباتی ممکن، منطقی به نظر می‌رسد.

٤. نتایج به دست آمده، حاکی از آن است که با انتخاب مناسب پارامترهای ابعاد، عدد تراکم پذیری و نسبت خارج از مرکزی، می‌توان به عملکرد استاتیکی و دینامیکی بهینه‌ای برای انواع متداول یاتاقان‌های گازی دست یافت.

۵. نتایج حاصل از بررسی عملکرد انواع یاتاقان‌های غیر مدور، می‌تواند راهنمای خوبی برای انتخاب یاتاقان بهینه جهت کاربردهای خاص باشد.

نمادها

پارامترهای بی بعد مسأله بدون علامت بار نمایش داده می‌شوند.

ضرایب میرایی فیلم سیال (گاز)؛ $m, n = x, y$ (Ns/m) $\bar{B}_{mn}$

لقی شعاعی(m)	$\bar{C}$
شعاع محور(m)	$\bar{R}$
کمترین مقدار لقی شعاعی موقع هم مرکزی محور و یاتاقان (m)	$\bar{C}_m$
نیروی سیال روی محور(N)	$\bar{F}$
ضخامت فیلم سیال(m)	$\bar{h}$
کمیت جرم بحرانی (Kg)	$\bar{M}_c$
فشار گاز نسبت به محیط، $\bar{P}/\bar{P}_a$	P
فشار محیط (N/m^2)	$\bar{P}_a$
افت انرژی(Watt)	$\bar{P}_L$
ضرایب سختی فیلم سیال(گاز)؛ $(N/m)\ m,n=x,y$	$\bar{S}_{mn}$
زمان (s)	$\bar{t}$
ظرفیت تحمل بار یاتاقان	W
سرعت محیطی محور (m/s)	$\bar{U}$
محورهای مختصات دکارتی با در نظر گرفتن مبدأ در مرکز یاتاقان	X,Y
مختصات اغتشاش محور	X',Y'

علائم یونانی

شدت غیر مدور بودن یاتاقان	δ
نسبت خارج از مرکزی یاتاقان	ε
زاویه‌ی مشخصه	ψ
مختصات زاویه‌ای اندازه‌گیری شده از محور X	θ
زاویه‌ی بین خط المرکزین یاتاقان و لب k ام با جهت مثبت محور X	θ_0^k
زاویه‌ی شروع لب k ام	θ_1^k
زاویه‌ی پایان لب k ام	θ_2^k
زاویه‌ی انحراف	θ_T
زاویه‌ی نصب	θ_M
سرعت دورانی محور (rad/s)	$\bar{\omega}$
عدد تراکم‌پذیری یا عدد یاتاقان	Λ
نسبت طول به قطر یاتاقان $(\bar{l}/\bar{d})$	λ
لزجت روانکار (Ns/m^2)	$\bar{\mu}$
قسمت موهومی ماتریس	i
قسمت حقیقی ماتریس	r
اشاره به لب	k

مراجع

۱. رشیدی، رضا و دشتی، اصغر، " تریبولوژی و نقش آن در صرفه جویی انرژی"، اولین کنفرانس اکو انرژی ایران، دانشگاه ارومیه، ایـران، (۱۳۸۳).

2. Kingsbury, A.,"Experiments with Air-Lubricated Journal", *J. Am.Soc.* Nav, Eng. , pp. 267-292, (1897).

3. Harrison, W.J., "The Hydrodynamical Theory of the Lubrication of a Cylindrical Bearing under Variable Load and of a Pivot Bearing", Trans. Cambridge Philos Soc., pp. 373-388, (1919).

4. Pinkus, O.,"Analysis of Noncircular Gas Journal Bearings", *J. Lub.Technol,* pp. 616-623, (1975).

5. Chandra, M., Malik, M., and Sinhasan, R., "Gas Bearing Analysis and Solution Method", Part 1:Dynamic, Wear, pp. 255-268, (1983).

6. Chandra, M., Malik, M., and Sinhasan, R., "Comparative Study of Four Gas- Lubricated Noncircular Journal Bearing Configurations ", Tribology International ,Vol. 16 No2, pp. 103-108, (1983).

7. Karkoub, M., and Elkamel, A., "Modeling Pressure Distribution in a Rectangular Gas Bearing Using Neural Networks", Tribology International, Vol30, pp. 139-150, (1997).

8. Kang, Yuan and Engineering Group, "Stiffness Determination of Angular– Contact Ball Bearing by Using Neural Network", Tribology International, pp. 1-9, (2005).

9. Frence, J., Nicolas, D., Degueurce, B., Berthe, D., and Gode, M.,"Hydro- dynamic Lubrication : Bearing and Thrust Bearing ", V.N. , Costantinescu , Elsevier, Amwsterda, (1997).

10. Rohde, S.M., and Oh, K.P., "Higher Order Finite Element Methods for the Solution of Compressible Porous Bearing Problems", *J. Lubr. Trans ASME,* pp. 793-803, (1968).

11. Reddy, J., "An Introduction to the Finite Element Method", McGraw-Hill, Newyork, U.S.A, (1984).

12. Frangu, L., and Ripa, L., " Artificial Neural Networks Applications in Tribology-A Survey", NIMIA-Sc, NATO Advanced Study Institute on Neural Networks, Crema, Italy, (2001).

13. Qin, P., Shen, Y., Zhu, J., and Xu, H., " Dynamic Analysis of Hydrodynamic Bearing-Rotor System Based on Neural Network", *International Journal of Engineering Science,* Vol. 43, pp. 520-531, (2005).

14. Menhaj, M.B, "Fundamentals of Neural Networks", Computational Intelligence, Vol. 1, No. 1, Tehran, Iran, (2000).

15. Demuth, H. B., Beale, M. H., and Hagan, M. T., "Neural Network Design", Pws Pub. Co., (1995).

۱۶. شنبه، م.، " استفاده از الگوریتم شبکه های عصبی مصنوعی در پیش بینی خصوصیات کششی نخ های مغزی دار با مغزی نایلون و رویه به"، مجله استقلال، جلد بیست و چهارم، شماره ۲، (۱۳۸٤).

17. Gurney, K.," An Introduction to Neural Networks" , UCL press, London, (1997).